

Стандартные оценки качества полевого сейсмического материала

Белоусов А.В., ЗАО НПЦ «ГеоСейсКонтроль», г.Москва

Настоящая статья посвящена обзору методов вычисления количественных оценок качества полевого сейсмического материала, используемых в целях контроля технологии производства сейсморазведочных работ. Рассматриваются оценки, ставшие за последние годы де-факто стандартом при приёме материалов.

Введение

Качество сейсмического материала и возможности его использования в целях динамической обработки, интерпретации и прогноза физических свойств горных пород в подавляющем большинстве случаев определяются условиями производства полевых сейсморазведочных работ. Именно поэтому на смену качественным, визуально-оптимальным критериям оценки сейсмограмм пришли количественные оценки качества.

Основная идея, заложенная в данные оценки – это возможность понять на начальной стадии, при производстве работ, способны ли применяемые средства решить поставленные геологические задачи. Как правило, в последнее время ставятся задачи не только структурного плана, но и получения динамически выраженной волновой картины, то есть критическими становятся не только прослеживаемость целевого горизонта, но и его частотный состав, уровень амплитуд по сравнению с реперными горизонтами и т.п.

Факторы качества

Следует отметить, что любые количественные оценки являются интегральными суммами нескольких факторов [2, 3]: технологического (соблюдение предписанной проектом методики и технологии работ, условий возбуждения и регистрации), методического (возможность в целом решить поставленную задачу при использовании данной системы наблюдений и параметров группирования), сейсмогеологического (изменчивость верхней части разреза, наличие многолетнемерзлых пород или зоны малых скоростей) и структурного (собственно характеристики отражающего горизонта). В идеале, оценка качества должна характеризовать, прежде всего, структурный фактор. В то же время достаточно тяжело разделить влияние перечисленных факторов на стадии получения материалов, при экспресс-анализе сейсмограмм и выдаче рекомендаций на переобработку физических наблюдений, не соответствующих принятым диапазонам оценок. В дальнейшем будем предполагать, что наблюдения проводятся при безусловном соблюдении методики и технологии работ, а при ухудшении качества материала сейсмогеологический фактор учитывается обязательным проведением дополнительных опытных работ.

Для характеристики основных участков сейсмограммы стандартно выбирается несколько окон по времени и удалениям. Это окна в зонах преобладания сигнала (реперных горизонтов и целевых пачек разреза), микросейсм и поверхностной волны.

Каждое из выбранных окон можно охарактеризовать набором амплитудных, спектральных и корреляционных характеристик (исходя из области вычисления), наиболее представительные и устойчивые из которых и форми-

руют понятие количественной оценки качества.

Для обеспечения стабильности оценок на вид окна анализа накладываются следующие ограничения:

- в горизонтальном направлении (удаления) – начало и конец окна расположены на двух сейсмических трассах (начальной и конечной, соответственно);
- в вертикальном направлении (время) – допустимы некоторые вариации. Так, окно может быть прямоугольной формы или повторять форму годографа волны, преобладающей в нём. Главное – временная длительность окна на всех трассах должна быть строго одинакова.

Амплитудные оценки

К амплитудным оценкам относятся:

- среднее абсолютное значение амплитуды в окне анализа;
- среднеквадратическое значение амплитуды в окне анализа.

Среднее абсолютное значение амплитуды в окне анализа

Данная оценка характеризует уровень колебательных процессов в окне.

Если несинусоидальная величина симметрична относительно оси абсцисс и не меняет знака в течение полупериода, то её среднее значение за половину периода равно среднему абсолютному значению. В случае гармонического колебания это значение в $\pi/2$ раз меньше максимального. Вычисление проводится следующим образом:

$$A_{avg} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |a_{i,j}| \quad (1)$$

где n – число трасс в окне анализа (первая трасса в данной нотации имеет номер 0, последняя – номер $(n-1)$);

m – число отсчётов в пределах окна для каждой трассы (первый отсчёт в данной нотации имеет номер 0, последний – номер $(m-1)$);

$a_{i,j}$ – значение амплитуды j -того отсчёта на i -той трассе.

Внешнее суммирование производится по номерам трасс (i) и, как правило, ограничивается определённым диапазоном удалений, внутреннее – по номерам отсчётов на текущей трассе (j) в пределах временного окна анализа.

Среднеквадратическое значение амплитуды в окне анализа

Данная оценка является статистической мерой энергии сигнала в окне. В случае гармонического колебания это значение в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального. Вычисление проводится следующим образом:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |a_{i,j}|^2} \quad (2)$$

Корреляционные оценки

К корреляционным оценкам относятся:

- доминирующая частота спектра;
 - соотношение сигнал/шум в пределах окна.
- Перед вычислением корреляционных оценок участки трасс, попадающие в окно анализа, центрируют, устраняя постоянную составляющую.

Доминирующая частота спектра

Частота, соответствующая первому пере-

СЕЙСМОРАЗВЕДКА
НА МОРЕ И НА СУШЕ

ходу через ноль автокорреляционной функции (АКФ) сигнала [6].

Известно, что АКФ периодического сигнала также периодична с тем же периодом колебаний. Это позволяет сделать предположение, что по изменению характера АКФ можно установить периодические свойства и для негармонического сигнала. Радиус корреляции будет определяться частотами, на которые приходится доминирующая часть энергии спектра. Следовательно, измерив период АКФ, можно оценить доминирующий период сигнала. Значения АКФ наиболее устойчивы в начальной части этой функции, поэтому оценивается время первого перехода через ноль, что соответствует четверти искомого периода. Значение времени второго перехода через ноль, определяющего три четверти периода, менее устойчиво к зашумлению и, как правило, не используется.

Таким образом, алгоритм расчёта доминирующей частоты таков:

1. расчёт средней трассы $\bar{a}(t)$, каждый j -тый отсчёт которой равен среднему значению соответствующих отсчётов всех трасс:

$$\bar{a}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} a_{i,j}$$

2. расчёт АКФ средней трассы:

$$B_{\bar{a}}(k) = \sum_{j=0}^{m-k} \bar{a}_j \bar{a}_{j+k}$$

3. поиск перехода через ноль τ (в секундах):

$$\begin{cases} B_{\bar{a}}(t=\tau) = 0 \\ B_{\bar{a}}(0 \leq t < \tau) \neq 0, \end{cases}$$

при этом в случае, если τ не попадает на дискрет записи, для получения наиболее точного значения τ должна использоваться интерполяция (линейная, сплайн) между отсчётами разных знаков.

4. Вычисление доминирующей частоты:

$$f_{dom} = \frac{1}{4\tau}$$

Точность определения доминантной частоты зависит от шага дискретизации записи, определяется использованным алгоритмом интерполяции и составляет, как правило, $\pm 3 - 5$ Гц для сигналов с частотой от 20 до 50 Гц при шаге дискретизации в 2 мс. При повышении спектральной разрешённости (для фиксированного шага дискретизации) наиболее существенную роль начинает играть алгоритм интерполяции и оценка становится неустойчивой. Так, для сигналов с исходной частотой 60 - 100 Гц погрешность в 0.5 мс при определении перехода АКФ через ноль приводит к смещению значения оценки на $\pm 15 - 30$ Гц.

Эквивалентный способ расчёта, требующий, однако, несколько больших вычислительных затрат - расчёт АКФ, поиск перехода через ноль и вычисление частоты для каждой трассы с последующим осреднением.

Соотношение сигнал/шум в пределах окна

Определяет насколько коррелируемый сигнал преобладает над случайным шумом в заданном окне. Эта оценка считается через соотношение корреляционных функций спектра как величина, равная отношению дисперсий сигнала и помехи, т.е. значение, обратное относительному отклонению колебательного процесса от его осреднённого значения. Не существует единого подхода к вычислению данного соотношения. Однако все разрабо-

танные формулы, так или иначе, включают в себя значения функций взаимной корреляции (характеризующие сигнал, т.к. шум считается абсолютно некоррелированным от трассы к трассе) и значения АКФ (определяющие суммарную энергию сигнала и помехи). Оценка ФВК эталонной трассы с каждой трассой (или ка энергии шума производится по значениям каждой трассы с каждой трассой) окна. Оценка энергии сигнала из значений АКФ.

В монографии Никитина А.А. и Петрова А.В. [4] приводится формула Яновского А.К. для вычисления дисперсионного (энергетического) соотношения сигнал/шум по двум трассам:

$$S/N = \frac{\max \{ \hat{B}_{1,2} \}}{1 - \max \{ \hat{B}_{1,2} \}}, \quad (3)$$

где $\max \{ \hat{B}_{1,2} \}$ - наибольшее значение нормы-
рованной ФВК:

$$\hat{B}_{1,2}(k) = \frac{\sum_{j=0}^{m-1-k} a_{1,j} \cdot a_{2,j+k}}{\sqrt{\sum_{j=0}^{m-1-k} a_{1,j}^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=0}^{m-1-k} a_{2,j}^2}}$$

Данная формула наиболее удобна для расчётов, т.к. не подразумевает осреднений при вычислении корреляционных функций и не накладывает ограничений на вычисляемые соотношения (за исключением базовых предположений: помеха некоррелирована между трассами, а сигнал коррелируется и сохраняет свою форму от трассы к трассе).

Возможны несколько способов получения окончательного соотношения оценки, зависящие от проведённых объёмов вычислений:

при последовательной корреляции пар трасс ($1 \otimes 2, 2 \otimes 3, 3 \otimes 4, \dots, (n-1) \otimes n$):

$$[S/N]_{FIN} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} [S/N]_{i,i+1};$$

при корреляции с эталонной трассой ($1 \otimes$ эталон, $2 \otimes$ эталон, $3 \otimes$ эталон, ..., $n \otimes$ эталон):

$$[S/N]_{FIN} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} [S/N]_{i, \text{эталон}}$$

при групповой корреляции (получении оценки для каждой пары трасс в окне: $1 \otimes 2, 1 \otimes 3, \dots, 1 \otimes n, 2 \otimes 3, 2 \otimes 4, \dots, 2 \otimes n, \dots, (n-1) \otimes n$):

$$[S/N]_{FIN} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} [S/N]_{i,j}$$

Отметим, что групповая корреляция может дать наиболее статистически достоверный результат.

В книге Хаттона и др. [5] в качестве меры амплитудного соотношения сигнал/шум (для вычисления соотношения среднеквадратической амплитуды сигнала к среднеквадратической амплитуде шума) приводится формула, отличающаяся от (3) только степенью:

$$S/N = \sqrt{\frac{\max \{ \hat{B}_{1,2} \}}{1 - \max \{ \hat{B}_{1,2} \}}} \quad (4)$$

Формула (4) из-за свойств операции взятия квадратного корня приводит к завышенным по сравнению с (3) оценкам для сильно зашумлённых данных ($S/N < 1$) и к заниженным - для данных с преобладанием сигнальной составляющей ($S/N > 1$).



Г.Н. Гогоненков и др. [1] в целях оценки качества предварительной обработки данных сейсморазведки предложили характеризовать сигнал средним значением каждого отсчёта, шум – суммой модулей отклонений значений каждой трассы от среднего (эталонного) значения, а для достижения статистической значимости рассчитывать корреляционную матрицу, включающую всевозможные корреляции пар трасс (т.е. производить групповую корреляцию) с последующим осреднением результата.

Тогда энергетическое соотношение сигнал/шум будет выражаться формулой:

$$S/N = \frac{\sum_{j=0}^n \left[(n\bar{a}_j)^2 - \sum_{i=0}^n a_{i,j}^2 \right]}{\sum_{j=0}^n \left[n \sum_{i=0}^n a_{i,j}^2 - (n\bar{a}_j)^2 \right]} \quad (5)$$

Для амплитудного соотношения зависимость такова:

$$S/N = \frac{n \sum_{j=0}^{n-1} |\bar{a}_j|}{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} |a_{ij} - \bar{a}_j|} \quad (6)$$

Для корректных вычислений по формулам (5) и (6) требуется, чтобы окно анализа было направлено вдоль оси синфазности.

В настоящее время для вычисления дисперсионного (энергетического) соотношения сигнал/шум наиболее часто используют формулу (3).

Спектральные оценки

К спектральным оценкам относятся:

- энергия спектра;
- энергия спектра на заданной (как правило, пиковой) частоте;
- пиковая частота;
- центральная частота;
- ширина спектра;
- процентная часть спектра.

Необходимо помнить, что при вычислении абсолютных значений амплитуд (энергий) по спектрам результат зависит от применяемого способа преобразования Фурье. При использовании действительного ДПФ, полученное значение будет вдвое превышать значение для комплексного ДПФ.

Для всех спектральных оценок при вычис-

лении значений целесообразно ограничить верхнюю частоту значением, сопоставимым с половиной частоты Найквиста, а нижнюю частоту – значением не ниже 1 Гц, исключив из трасс постоянную составляющую компенсацией постоянного смещения, т.е. вычитанием среднего значения.

Энергия спектра

Энергия спектра вычисляется как площадь под графиком значений амплитудного спектра сигнала:

$$E = \sum_{f=0}^{f_N} df \cdot A(f), \quad (7)$$

где f – текущее значение частоты, Гц;

f_N – частота Найквиста, Гц;

$df = \frac{1}{N} dt$ – шаг частот в спектре (N – число

точек преобразования Фурье, dt – шаг дискретизации, с);

$A(f)$ – значение амплитуды спектра на текущей частоте.

Приведённая формула описывает взятие определённого интеграла методом прямоугольников. Точности, обеспечиваемой этим методом, достаточно для получения устойчивой оценки.

Энергия спектра на заданной частоте

Мера энергии спектра для целевого диапазона частот:

$$E_R = \sum_{f=f_1}^{f_2} df \cdot A(f) \quad (8)$$

где f_1 – минимальная частота целевого диапазона, Гц; f_2 – максимальная частота целевого диапазона, Гц.

Пиковая частота

Значение частоты, для которой амплитуда спектра максимальна:

$$f_{\max} = f \Big|_{A=\max(A(f))} \quad (9)$$

Эта оценка даёт значения, близкие к доминирующей частоте. Вычисление её представляет альтернативный способ выделения наиболее существенной гармоник спектра.

Центральная частота

Статистическая оценка равномерности распределения частот в спектре. Это такая частота f_c , для которой площадь спектра слева равна площади справа:

$$E_R(f < f_c) = E_R(f > f_c) \quad (10)$$

Для оценки равномерности, как правило, выбирается не весь спектр, а его часть, сосредоточенная в районе пиковой (максимальной) частоты – см. рис. 1 ниже. В выделенной области рассчитывается энергия спектра E , далее осуществляется постепенное накопление энергии, начиная с нижней частоты области и до тех пор, пока накопленная энергия не превысит $0.5E$. Частота, на которой пройден данный порог, и будет центральной частотой спектра.

При производстве работ данная оценка должна быть близка к пиковой частоте, отличаясь от неё обычно в меньшую сторону на 1 – 3 Гц.

Существенные отличия говорят о многомодальном распределении спектра и виде спектра, нехарактерном для производ-

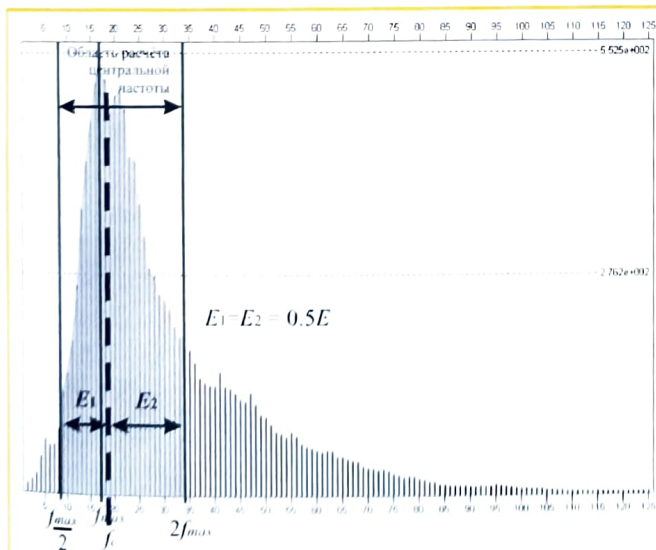
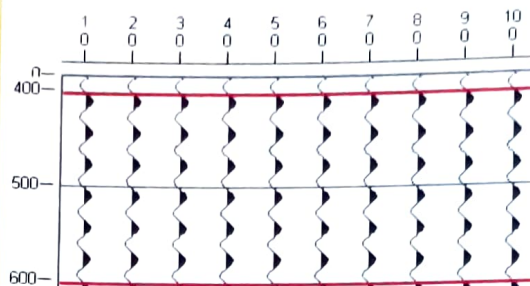
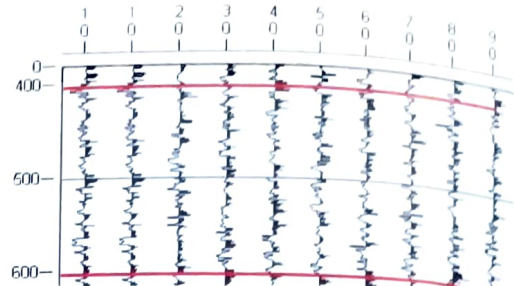


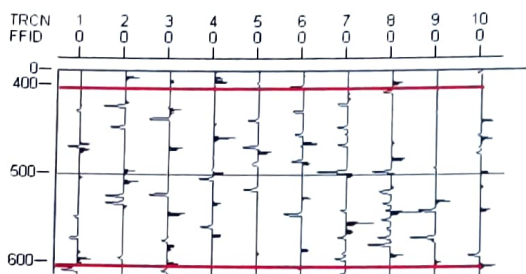
Рис.1. Расчёт центральной частоты



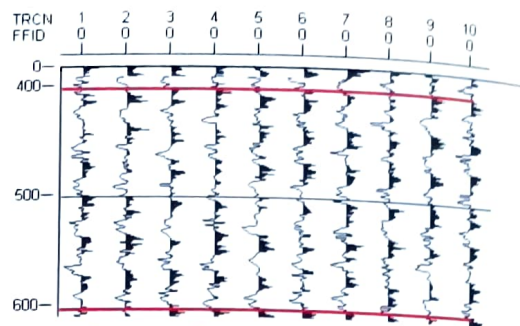
Пример 1. Синусоидальный сигнал единичной амплитуды и частоты 30 Гц, окно 200 мс.



Пример 2. Гауссовский шум, среднее по модулю значение 1



Пример 3. Случайный разреженный шум, максимальное по модулю значение 1



Пример 4. Совмещённые сигнал и шум

Рис.2. Модельные примеры

ственных работ.

Ширина спектра

Является мерой оценки спектральной разрешённости записи. Порядок вычисления таков: в спектральной области строится прямоугольник, вертикальная сторона которого определяется значением амплитуды спектра на пиковой частоте, а площадь равна энергии спектра. Тогда ширина данного прямоугольника и даст ширину спектра:

$$D_E = \frac{E_R(f_{\max})}{E} \quad (11)$$

Ширина спектра измеряется в Герцах.

Процентная часть спектра

Данная оценка представляет собой отно-

шение энергии спектра для целевого диапазона частот к энергии всего спектра, выраженное в процентах. Показывает долю энергии, приходящуюся на целевой интервал:

$$K_E = \frac{E_R}{E} \quad (12)$$

Эта оценка достаточно часто используется для определения доли низких/высоких частот в исходном спектре записи. E_R вычисляется для диапазона от 1 Гц до $f_N/4$ для низких частот (или от $f_N/4$ до $f_N/2$ для высоких).

Модельные примеры. Некогерентный шум

Рассмотрим описанные характеристики на

Вид оценки	Пример 1. Чистый сигнал	Пример 2. Гауссовский шум	Пример 3. Разреженный шум	Пример 4. Совмещённые сигнал и шум.
Амплитудные оценки				
A_{avg}	0.630	0.815	0.098	0.482
A_{rms}	0.704	1.001	0.351	0.600
Корреляционные оценки				
f_{dom}	29.59	140.94	128.98	32.39
S/N (формула (3))	∞	0.2758	0.5382	0.5823
S/N (формула (4))	14270.00	0.5211	0.7193	0.7597
S/N (формула (5))	∞	0.0345	0.132	0.3785
S/N (формула (6))	∞	0.2409	0.5084	0.7761
Спектральные оценки				
E	513.40	1071.40	381.92	664.373
$E_R(f_{\max})$	50.00	12.66	4.03	23.324
$f_{\max}$	30	97	99	30
f_c	30	86	89	31
D_E	10.27	84.65	94.85	28.48
K_E	94.18	49.13	47.95	57.79

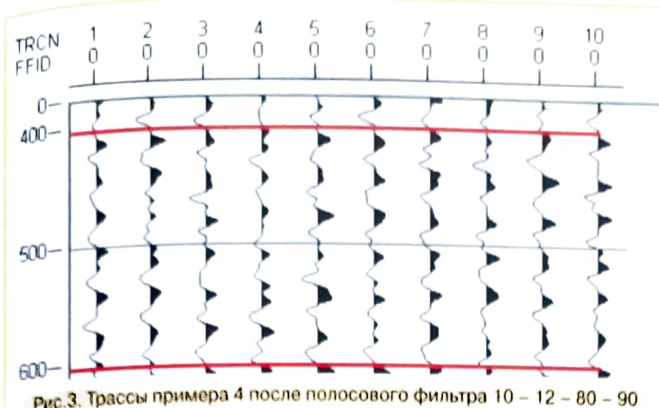


Рис. 3. Трассы примера 4 после полосового фильтра 10 – 12 – 80 – 90

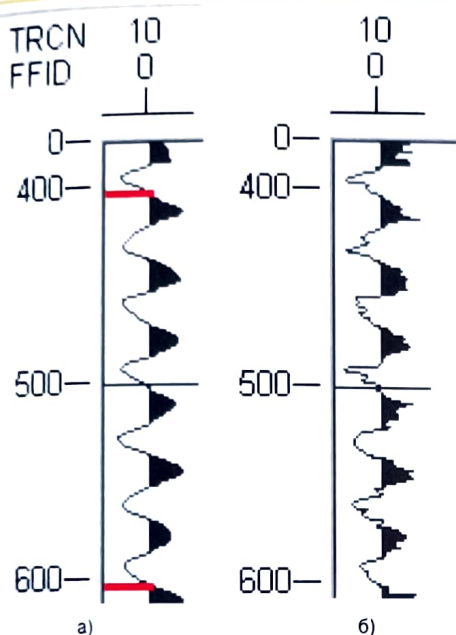
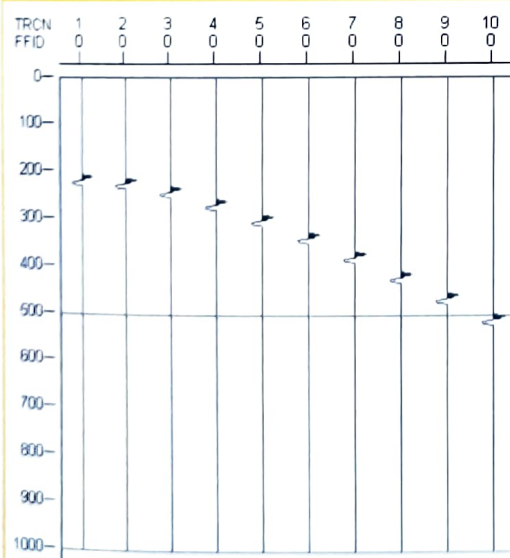
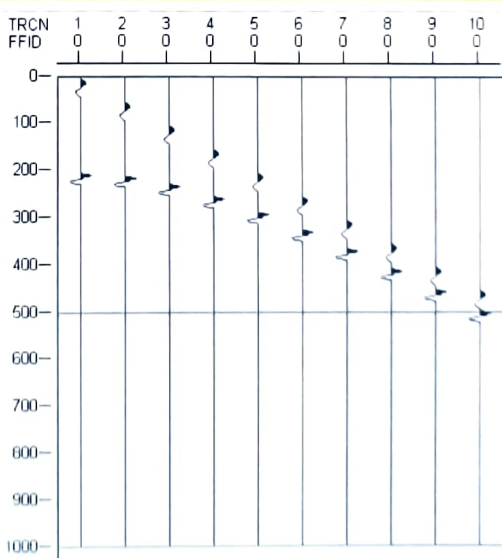


Рис. 4. Трассы примера 4: (а) после полосового фильтра и последующего суммирования по ОСТ; (б) после суммирования по ОСТ без фильтрации



Пример 5. Гиперболический годограф отражённой волны (чистый сигнал)



Пример 6. Годографы отражённой и прямой волн (сигнал + когерентный шум)

Рис. 5. Модельные примеры для случая когерентного шума

нескольких характерных модельных примерах.

Вначале остановимся на влиянии некогерентного шума на характеристики сигнала в окне. Для этого выделим чистый синусоидальный сигнал с частотой 30 Гц (пример 1), некогерентный шум с Гауссовским (пример 2) и разреженным распределением (пример 3), а также сумму сигнальной и шумовой компонент (пример 4 = пример 1 + пример 2 + пример 3). Изображения модельных трасс приведены на рис 2 выше.

Для указанных примеров рассчитаны оценки в окне протяжённостью 200 мс, охватывающем все трассы модели. Расчётные данные сведены в таблицу ниже. Все спектральные оценки вычислены в диапазоне 1 – 125 Гц для случая ДПФ действительных последовательностей.

Некогерентный шум характеризуется высоким значением доминантной частоты и довольно различными, в зависимости от природы шума, амплитудными и энергетическими оценками. Ширина спектра, как правило, велика и существенно превышает соответствующую оценку для сигнала. Корреляционное соотношение сигнал / шум существенно меньше единицы.

Зашумление сигнала данными видами шума (пиковая амплитуда всех трёх просуммированных трасс равна единице) не приводит к потере информации о сигнале, хотя и существенно снижает его динамическую выраженность и корреляционную оценку сигнал/шум в пределах окна. Стандартные способы борьбы с некогерентными шумами таковы:

- на уровне источников: увеличение веса заряда при взрывном возбуждении колебаний, увеличение числа накоплений при вибрационном и импульсном возбуждении, группирование источников;
- на уровне приёмников: группирование (линейное, площадное) сейсмоприёмников для достижения статистического эффекта

СЕЙСМОРАЗВЕДКА НА МОРЕ И НА СУШЕ

Вид оценки	Пример 5. Сигнал отражённой волны	Пример 6. Когерентный шум
Амплитудные оценки		
A_{avg}	0.025	0.047
A_{rms}	0.143	0.170
Корреляционные оценки		
f_{dom}	35.97	31.89
S/N (формула (3))	437.7243	4.4287
S/N (формула (4))	16.6983	1.9420
S/N (формула (5))	-0.0015	0.0143
S/N (формула (6))	0.5473	0.5336
Спектральные оценки		
E	336.73	374.70
$E_{eff}(f_{max})$	6.35	8.39
f_{max}	35	26
f_c	39	31
D_E	53.02	44.68
K_E	64.15	85.35

подавления некогерентного шума, сопоставимого с корнем квадратным из числа элементов группы;

на уровне обработки: полосовая фильтрация (стандартный полосовой фильтр 10 – 12 – 80 – 90 обеспечивает достаточную степень подавления), суммирование по ОСТ (статистический эффект, пропорциональный корню квадратному из числа трасс в подборке ОСТ).

При производстве сейсморазведочных работ некогерентный шум обычно отождествляется с микросейсмическим фоном и оценивается через соотношение амплитуд в двух окнах – на уровне целевого горизонта (сигнальное окно) и в начале записи, до первых вступлений (окно микросейсм). Подобное соотношение показывает большую устойчивость по сравнению с корреляционным критерием сигнал/шум, рассмотренным выше.

Уровень шума считается приемлемым для решения структурных задач, если сигнал (отражения от целевых горизонтов) по амплитуде (средней абсолютной или среднеквадратической) выше его в 5 – 10 раз. Данное значение (в отличие от модельного, приведённого в примерах выше, при котором разделение сигнала и помехи достигается только за счёт накапливания, фильтрации и суммирования по ОСТ – в отсутствие каких-либо внешних факторов и при идеальной форма сигнала) учитывает также неидеальность условий приёма и возбуждения колебаний. Уровень микросейсмического фона не должен влиять (и как-либо проявляться) при обработке записей, в частности, разделение сигнала и шума должно происходить автоматически, уже исходные данные должны обеспечить неискажённую картину, примерно ту же, что наблюдается на рис.3, а выше.

Решение динамических задач при обработке и интерпретации требует повышения указанного соотношения до значений 10 – 20 раз, в зависимости от сейсмогеологических условий.

Модельные примеры. Когерентный шум

Рассмотрим теперь случай наличия когерентного шума в окне. Зададим форму сигнала

в виде одного периода синусоиды частотой 40 Гц, максимальная амплитуда 1, а форму шума – в виде одного периода синусоиды частотой 25 Гц, максимальная амплитуда 0.5. Пусть сигнал изменяется в окне по гиперболической траектории, а шум – по линейному закону. Изображения соответствующих моделей приведены на рис.5 ниже.

Для указанных примеров рассчитаны оценки в окне протяжённостью 500 мс (0 – 500 мс), охватывающем все трассы модели. Расчётные данные сведены в таблицу ниже. Все спектральные оценки вычислены в диапазоне 1 – 125 Гц для случая ДПФ действительных последовательностей.

Видно, что наличие когерентной помехи в окне делает корреляционные оценки, в т.ч. соотношение сигнал/шум, непригодными для анализа. В корреляционном смысле сигналом считается волна с наибольшим значением ФВК и совершенно необязательно, что это будет отражённая волна.

В то же время спектральные оценки остаются в некоторой степени значимыми. Амплитудные оценки определяются во многом уже энергией волны-помехи. Наиболее устойчивыми в данном случае являются оценки среднеквадратической амплитуды и центральной частоты сигнала.

Таким образом, крайне важно, чтобы окно анализа включало бы в себя один и только один тип волн – будь то целевые отражённые волны или волны-помехи. В ином случае оконные оценки теряют свой смысл.

Заключение

Из приведённого обзора видно, что количественные оценки качества полевого сейсмического материала позволяют достаточно полно его охарактеризовать, дополнить и уточнить визуальные критерии, принятые ранее. Применение количественного анализа, как указывалось в [1], позволяет объективизировать последовательность принятия решений по оптимизации проведения работ, выбору последовательности и параметров предварительной обработки, обеспечивая тем самым наиболее эффективное решение поставленных задач.

Литература

1. Гогоненков Г.Н., Кравцов Б.Я., Черняк В.С. Оценка эффективности предварительной обработки сейсмических данных // Прикладная геофизика № 78, 1975 – стр. 3 – 15.
2. Закариев Ю.Ш., Марутян В.Г., Мусагалиев М.З. и др. Оценка качества полевых сейсмических данных и основные факторы, влияющие на него // Геофизика, №4/2007. – стр. 82 – 92.
3. Закариев Ю.Ш., Мусагалиев М.З., Плешкевич А.Л. и др. Методика количественного анализа опытных работ на примере вибросейсмических работ в Западном Казахстане // Приборы и системы разведочной геофизики №2/2006.
4. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: РГГРУ, 2008.
5. Хаттон Л., Уэдрингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989.
6. Barnes A.E. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data // Geophysics, vol.58 (1993), no.3, pp. 419 – 428.